

مهندسی متالورژی و مواد

https://jmme.um.ac.ir/



بررسی تأثیر دما و زمان لحیم‌کاری سخت بر اتصال ساندویچی فولاد زنگ‌نزن*

معصومه خیاط(۱)　　　بهروز بیدختی(۲)

DOI: 10.22067/jmme.2022.77394.1059

چکیده *برای تولید مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای، صفحات فولاد زنگ نزن به‌صورت ساندویچی به یکدیگر متصل می‌شوند. برای این نوع اتصال می‌توان از روش لحیم‌کاری سخت که در آن اتصال دهی تحت خلأ صورت می‌گیرد، استفاده نمود. به‌همین منظور در این طرح، صفحات فولاد زنگ نزن 316L به‌صورت چند لایه (۲ و ۵ لایه) توسط لایه واسطه مس که نسبت به سایر فلزات پرکننده مقرون به‌صرفه‌تر و دارای دمای ذوب پایین‌تر است و امکان ایجاد استحکام اتصال نسبتا مناسب دارد، به یکدیگر متصل شدند. متغیرهای این پژوهش، دما (۱۰۷۰ و ۱۱۲۰ درجه سانتی‌گراد) و زمان (۳۰، ٦۰ و ۹۰ دقیقه) بود. تصاویر میکروسکوپی که برای بررسی ریزساختار درز اتصال گرفته شد، نشان داد که اتصال ایجاد شده در دمای ۱۰۷۰ درجه سانتی‌گراد نسبت به ۱۱۲۰ درجه سانتی‌گراد مناسب و یکپارچه نبوده و اتصال در دمای ۱۱۲۰ درجه و زمان ۹۰ دقیقه به‌دلیل فرصت کافی برای ذوب لایه واسطه و نفوذ عناصر، خواص بهتری داشت. همچنین نمونه‌های دولایه با متوسط اندازه دانه کمتر، سختی بالاتری داشتند.*

واژه‌های کلیدی اتصال ساندویچی، فولاد زنگ‌نزن، لحیم‌کاری سخت، مبدل حرارتی.

Investigating the effect of Brazing Time and Temperature on Stainless Steel Sandwich Joints

M. Khayyat　　　B. Beidokhti

Abstract *Brazing of low-carbon austenitic stainless steel sheets is applied to produce plate heat exchangers. In this study, the copper filler was used to join multiple layers of 316L steel plates due to its low cost, low melting temperature and relatively good bonding strength compared to other filler metals. For comparison, 2-layer and 5-layer specimens were brazed with the copper interlayer. fabricated. The sandwich joints have been fabricated under different process conditions of the brazing temperature (1070 and 1120°C) and the brazing time (30, 60, and 90 min). Detailed microstructural studies and hardness were carried out on the brazed joints. The microscopic studies showed that the joint formed at 1070 °C was not uniform compared to 1120 °C and the specimen brazed at 1120°C/90 min presented better properties due to enough time for melting of the interlayer and diffusion of elements. Also, 2-layer specimens with lower average grain size had higher hardness than 5-layer specimens.*

Key Words Sandwich joint, Stainless steel, Brazing, Heat exchanger.

* تاریخ دریافت مقاله ۱٤۰۱/٤/٦ و تاریخ پذیرش آن ۱٤۰۱/۹/۲٦ می‌باشد.

(۱) کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مواد و متالورژی، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد.

(۲) نویسندۀ مسئول، دانشیار، گروه مهندسی مواد و متالورژی، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد.

Email: beidokhti@ferdowsi.um.ac.ir

مقدمه

به عقیده محققان و همچنین مهندسان، مواد مانند فلزات، سرامیک‌ها و یا پلیمرها جهت برآورده نمودن تمام نیازهای فن‌آوری برای انواع کاربردها، باید با یکدیگر ترکیب شوند [1]. یکی از روش‌های ترکیب مواد، اتصال آن‌ها به یک‌دیگر به‌روش ساندویچی را می‌توان نام برد. اتصال ساندویچی شامل قرار گرفتن لایه‌های مختلف بر روی یکدیگر و اتصال آن‌ها به هم‌دیگر توسط روش‌های مختلف مانند پیچ و مهره [2]، پرچ [3]، جوشکاری مقاومتی [1]، جوشکاری با گاز [2] یا جوشکاری لیزر [4] است. اتصالات ساندویچی در صنایع کشتی سازی[3] ، تجهیزات پرتاب سفینه به فضا [4] و تولید مبدل‌های حرارتی [5] استفاده می گردد.

مبدل‌های صفحه‌ای نسل نسبتاً جدیدی از مبدل‌های حرارتی هستند که از تعداد زیادی صفحات شورون (Chevron) دار از جنس فولاد زنگ‌نزن تشکیل‌شده‌اند. بین این صفحات انتقال حرارت به این صورت که گرما از جسم با دمای بیشتر به جسم با دمای کمتر منتقل می‌شود، انجام می‌شود [5].

یکی از روش‌های اتصال‌دهی جهت تولید مبدل‌های حرارتی علاوه بر جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای، جوشکاری نفوذی و یا واشر، لحیم‌کاری است. لحیم‌کاری یکی از متداول‌ترین روش‌های اتصال فلزات است که در آن دو یا چند قطعه با استفاده از ذوب و جریان یافتن ماده مصرفی که نسبت به فلز پایه نقطه ذوب پایین‌تری دارد، به یکدیگر متصل می‌شوند. عدم ذوب قطعات در این فرایند موجب عدم تغییر خواص متالورژیکی آن‌ها می‌شود [6]. لایه واسطه مس به‌دلیل مقرون به‌صرفه بودن، پایین بودن دمای ذوب، ایجاد استحکام اتصال نسبتا مناسب و نیز رسانایی حرارتی بالایی که دارد، در مقایسه با سایر پرکننده‌ها نظیر نقره یا نیکل انتخاب مناسبی برای این کاربرد می‌باشد [7].

درجه حرارت، زمان نگهداری و اتمسفر کوره از پارامترهای مهم لحیم‌کاری سخت در کوره تحت خلأ می‌باشد. همچنین از مشکلات شناسایی شده در اتصالات لحیم‌کاری سخت می‌توان عیوبی مانند تخلخل، حفره‌ها و تشکیل فازهای بین فلزی مضر را نام برد. جنبه‌های تعیین کننده یک اتصال مناسب به‌روش لحیم‌کاری سخت، ذوب فلز پرکننده و عدم تشکیل فازهای مضر در درز اتصال است. فلز پرکننده که می‌تواند خالص و یا آلیاژی باشد، با قرارگیری بین سطوح مواد پایه اتصال را برقرار می‌سازد. همچنین برای جلوگیری از تشکیل فازهای ناخواسته و مضر، اتصال در اتمسفر خلأ ترجیح داده می‌شود [8].

های (Hye) و همکارانش [9] لحیم‌کاری سخت آلیاژ مس–کروم و فولاد زنگ نزن دوپلکس توسط فلز پرکننده مسی در شرایط مختلف دمایی و زمانی تحت خلا بالا را بررسی کردند که نتایج آن‌ها نشان داد در دماهای پایین نیز فازهای Mn-Fe ، Mn-Cr و Cu-Mn تشکیل شده و با افزایش زمان نگه‌داری، فاز Mn-Fe به Cr-Fe تبدیل شده و فاز Mn-Cr و Cu-Mn افزایش یافت. همچنین فلز پرکننده به فصل مشترک فاز α/γ فلز پایه نفوذ نموده و فاز γ را به α تبدیل کرده است. مقاومت برشی اتصال نیز نصف استحکام کششی آلیاژ مس–کروم تخمین زده شد. در پژوهشی دیگر، سواتی (Swathi) و همکارانش [10] لحیم‌کاری‌سخت فولاد زنگ نزن و آلیاژ مس با استفاده از فلز پرکننده مس تحت خلأ بالا و شرایط دمایی و زمانی مختلف را مورد مطالعه قرار دادند. بررسی‌های ریزساختاری و مکانیکی نشان داد با افزایش دما تا حد بهینه به‌دلیل افزایش نفوذ عناصر، اتصال یکنواخت‌تر و مقاومت برشی اتصال افزایش می‌یابد.

در مطالعه‌ای دیگر، ژو (Zhu) و همکارانش [11] اتصال لحیم‌کاری سخت فلزات پایه HNS و ۳۱۶L را با فلز پرکننده Ag-Cu در کوره خلأ بالا برای مدت زمان‌های مختلف مورد بررسی قرار دادند. بررسی‌های ریزساختاری نشان داد اتصال ۳۱۶L/۳۱۶L شامل β-Cu و یوتکتیک Ag-Cu صاف و اتصال HNS/HNS شامل α-Ag و یوتکتیک Ag-Cu دندانه شکل بود. همچنین با افزایش زمان، میزان پهنای اتصال در اتصال HNS/HNS کاهش یافته اما در اتصال ۳۱۶L/۳۱۶L تغییر چندانی نکرده بود. میزان مقاومت برشی اتصال HNS/HNS از اتصال ۳۱۶L/۳۱۶L بیشتر بود. اتابکی (Atabaki) و همکارانش [12] نیز صفحات فولاد زنگ نزن ۳۰۴ را توسط پرکننده مس خالص به روش لحیم‌کاری سخت نفوذی تحت خلا بالا در دماها و زمان‌های مختلف اتصال دادند. بررسی‌های ریزساختاری نشان داد یوتکتیک γFe و فازهای بین فلزی در اتصال تشکیل شده و با افزایش زمان، میزان نفوذ افزایش پیدا کرده و میزان نفوذ مس

از طریق مرز دانه بسیار بیشتر از نفوذ از طریق شبکه بود. ژانگ (Zheng) و همکارانش [13] ریزساختار و خواص مکانیکی اتصال لحیم‌کاری سخت فولاد زنگ نزن و آلومینیوم-برنز توسط پرکننده مس آلیاژی را بررسی نمودند. در درز اتصال محلول جامدهای Cr-Ni و Ni-Mn تشکیل شده بود. همچنین با افزایش دما، ضخامت لایه واکنشی و مقاومت برشی اتصال افزایش یافته بود. در مطالعه‌ای دیگر، فوکیکوشی (Fukikoshi) و همکارانش [14] فولاد زنگ نزن ۳۰٤ را به مس توسط دو آلیاژ پرکننده متفاوت نقره- مس با لحیم‌کاری سخت تحت گاز آرگون متصل نمودند. آن‌ها نتیجه گرفتند تغییر درصد نقره از ۷۲ به ۵۰ درصد تأثیری بر میزان سیالیت آلیاژ نقره-مس ندارد و می‌توان از درصدهای کمتر نقره استفاده کرد.

بیشتر تحقیقات انجام شده تاکنون روی اتصالات دولایه آلیاژهای مختلف بوده است و تحقیقات کمتری شرایط لحیم‌کاری در حالت اتصال ساندویچی را بررسی کرده‌اند. در این پژوهش، صفحات فولاد زنگ نزن ۳۱٦L به‌کمک فلز پرکننده مسی به‌روش لحیم‌کاری سخت به یکدیگر متصل شدند. در این فرآیند، لایه های فولاد زنگ نزن توسط فلز پرکننده مسی به‌صورت ساندویچی تحت خلأ بالا و فشارهای نسبتا پایین متصل گردیدند. تاثیر دما و زمان فرآیند بر روی کیفیت درز اتصال توسط میکروسکوپ نوری از نظر پیوستگی بررسی شد. همچنین برای بررسی نفوذ عناصر از طیف سنجی پراش انرژی پرتو ایکس (Dispersive X-ray Spectroscopy Energy) (EDS) استفاده گردید. در این کار با تغییر متغیرهای دما و زمان سعی شده است بهترین شرایط برای یک اتصال مناسب، یکپارچه و مستحکم را فراهم آورد.

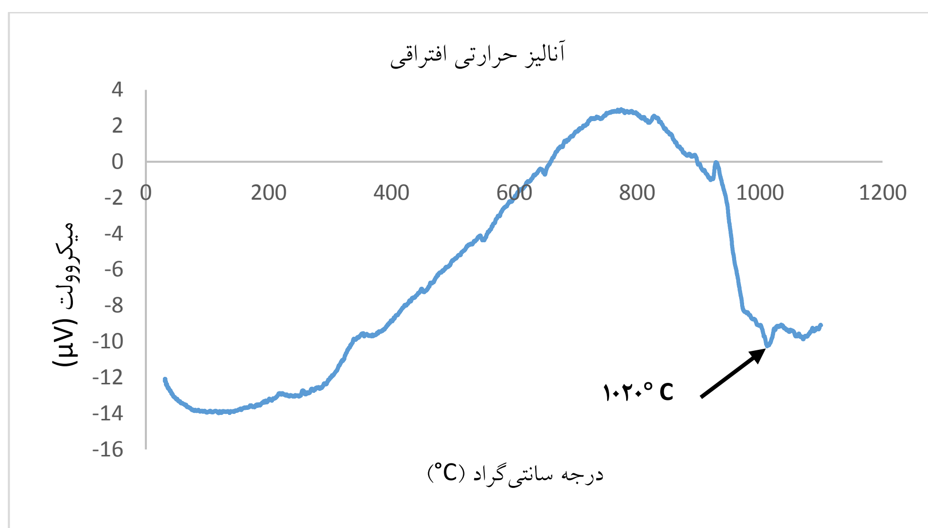
مواد و روش پژوهش

برای این پژوهش از ورق های فولاد ز نگ نزن ۳۱٦L و مس خالص ا ستفاده گردیده که در جدول (۱) ترکیب شیمیایی آن‌ها آورده شـــده اســـت. همچنین ن‌تایج آ نالیز حرارتی افتراقی (Differential Thermal Analysis) (DTA) برای تعیین نق‌طه ذوب فلز پرکننده م‌سی نیز در شکل (۱) آورده شده ا ست که نشـــان داد د مای ذوب آن ۱۰۱٤ در جه ســـانتی‌گراد بود. ابعـاد ورق‌هـای فولاد زنـگ نزن ۳۱٦ و مس برابر ۳۵*۲۰ میلی‌متر و به‌ترتیب با ضـــخامت ۰٫٦ میلی‌متر و ۵۰ میکرون بودند.

این ورق‌ها به‌صورت یکی درمیان کنار هم به شکل دو نوع نمونه یکی به‌صورت دولایه فولاد ۳۱٦ و یک ورق مسی و دیگری به‌صورت پنج لایه فولاد ۳۱٦ و چهار لایه مسی داخل فیکسچر قرار گرفتند و در کوره خلأ با فشار 10^{-3} میلی‌بار گذاشته شدند. آزمایش‌ها در دو دمای ۱۰۷۰ و ۱۱۲۰ درجه سانتی‌گراد، مدت زمان‌های ۳۰،٦۰ و ۹۰ دقیقه و فشار ۵ مگاپاسکال انجام شد. سپس نمونه‌ها بعد از برش و مانت، متالوگرافی و الکترواچ شدند و تصاویر نوری از ریزساختار درز اتصال گرفته شد. سپس جهت بررسی مقایسه میزان نفوذ عناصر در امتداد درز اتصال، از میکروسکوپ الکترونی روبشی (Scanning Electron Microscope) (SEM) همراه با آنالیز طیف سنجی پراش انرژی پرتو ایکس و نیز برای تعیین نوع فازهای ایجاد شده از آزمون تفرق اشعه ایکس (X-Ray Diffraction Analysis) (XRD) استفاده شد. برای اندازه‌گیری ضخامت لایه نفوذ و میانگین اندازه دانه نیز از نرم افزار MIP استفاده شد. همچنین آزمون ریزسختی سنجی هم روی نمونه ها صورت گرفت.

جدول ۱ ترکیب شیمیایی فولاد ۳۱٦L و مس

درصد عناصر	Fe	Cu	Cr	Ni	Mn	S	P	Si	Mo	C	Zn
فولاد۳۱٦L	پایه	-	16.7	13.3	2	0.02	0.03	1	2.5	0.03	-
مس	۰٫۰۰۳	پایه	–	۰٫۰۰۰۵	–	–	0.6	–	–	–	۰٫۰۳



شکل ۱ آنالیز حرارتی افتراقی پرکننده مسی

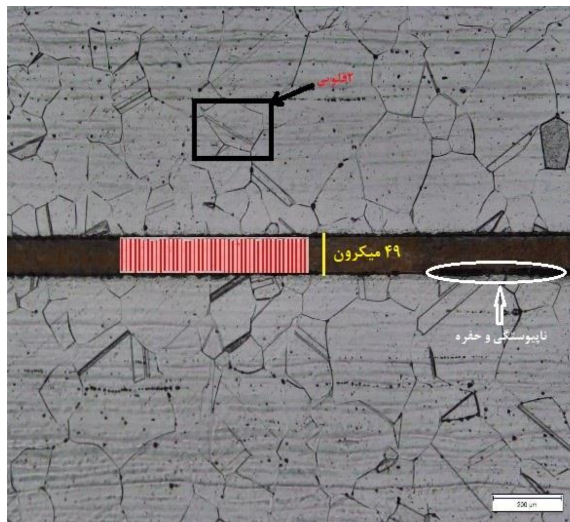
نتایج و بحث

با توجه به شکل‌های (۲–الف) و (۲–ب مشاهده می‌گردد که دمای ۱۰۷۰ درجه سانتی‌گراد برای این اتصال کافی نبوده و فلز پرکننده مسی به داخل زمینه فولادی به اندازه کافی نفوذ نکرده است و حفرات و ناپیوستگی‌ها به وضوح قابل مشاهده‌اند.؛ اما در شکل‌های (۲–ج) و (۲–د) برای اتصال‌دهی در دمای ۱۱۲۰ درجه سانتی‌گراد، پرکننده مسی در زمینه نفوذ کرده است. همچنین با درنظرگرفتن نفوذی بودن فرآیند و ضخامت اولیه ۵۰ میکرونی لایه واسطه مسی، با مقایسه تصاویر می‌توان دریافت که پهنای ناحیه اتصال پس از نفوذ مس به زمینه فولادی از محدوده ۴۹–۴۹٫۳ میکرون به ۳۵–۳۳ میکرون کاهش پیدا کرده است. طبق نمودار زمان–دما–استحاله عملیات حرارتی فولاد زنگ نزن آستنیتی، گرم کردن زمینه فولادی حین فرآیند اتصال‌دهی در دمای ۱۰۷۰ درجه سانتی گراد، موجب انحلال کاربیدهای کروم می‌گردند. این موضوع توسط دیگر محققان هم گزارش شده است [15]. با افزایش دما تا ۱۱۲۰ درجه سانتی‌گراد علاوه بر افزایش سرعت انحلال کاربیدها، با مقایسه میانگین اندازه دانه شکل (۲–الف) با (۲–ج) که از ۲۰۰ به ۹۹ میکرومتر و شکل (۲–ب) با (۲–د) که از ۲۱۴ به ۹۵ میکرومتر کاهش یافته، می‌توان دریافت که اندازه دانه‌ها کوچک و تبلور مجدد ثانویه [15] نیز اتفاق افتاده است.

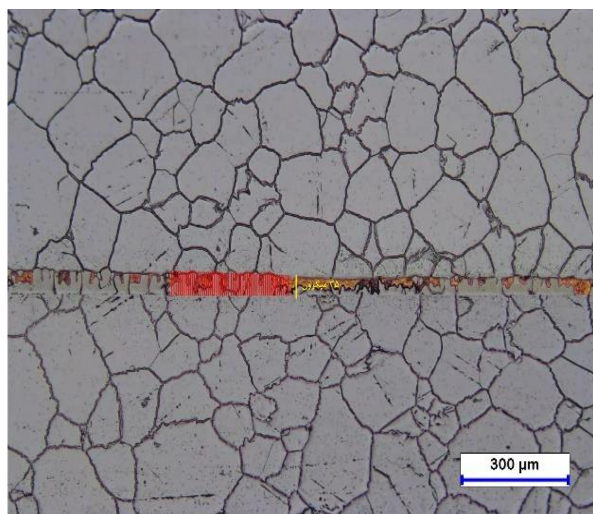
شکل (۳) تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی درز اتصال برای نمونه‌های ۱۰۷۰–۶۰ دقیقه و ۱۱۲۰–۶۰ دقیقه را نمایش می‌دهد. همان‌طور که در شکل (۳) مشاهده می‌گردد، فلز پایه تو سط فلز پرکننده انحلال یافته و فصل مشترکی دندانه‌ای شکل ایجاد نموده است. در واقع با برهمکنش مایع و جامد، هنگامی که مرزدانه، فصل مشترک مایع و جامد را قطع می‌کند، به‌منظور دستیابی به تعادل انرژی بین دو فصل مشترک، نفوذ مایع در امتداد مرزدانه رخ می‌دهد و منجر به ایجاد یک شیار می‌گردد. شیاردار شدن مرزدانه‌ها، میزان نفوذ عناصر حل شونده را به علت منحنی شکل بودن فصل مشترک مایع/جامد و افزایش نفوذ مرزدانه‌ای، افزایش می‌دهد. لذا، از آن‌جایی که انحنای فصل مشترک باعث افزایش حل شونده می‌شود، انحلال‌پذیری با کاهش اندازه دانه فولاد زنگ‌نزن افزایش می‌یابد. بر این اساس، با مقایسه اندازه دانه نمونه‌ها در دو دمای ۱۰۷۰ و ۱۱۲۰ درجه سانتی‌گراد، می‌توان نتیجه گرفت که با کاهش اندازه دانه، انحلال پذیری افزایش یافته و فصل مشترک زمینه/پرکننده غیریکنواخت است. همچنین با افزایش انحنای فصل مشترک نا شی از افزایش دما از ۱۰۷۰ به ۱۱۲۰ درجه سانتی‌گراد، میزان جریان یافتن مذاب به داخل زمینه افزایش پیدا می‌کند. پس از شیاردار شدن مرزدانه‌ها، فلز زمینه داخل مذاب مس تا زمانی که در دمای لحیم‌کاری سخت به یک ترکیب تعادلی برسد، انحلال می‌یابد. در این هنگام یک فاز آهن با درصد کربن بالا تشکیل می‌شود که این فاز در مذاب مس از میزان تعادلی انحلال خود بیشتر می‌گردد. بنابراین این فاز به صورت ترکیبی از Fe-Cu-C در فصل مشترک فلز زمینه–پرکننده رسوب می‌نماید که عامل آن نفوذ مس در فولاد زنگ نزن است [12].



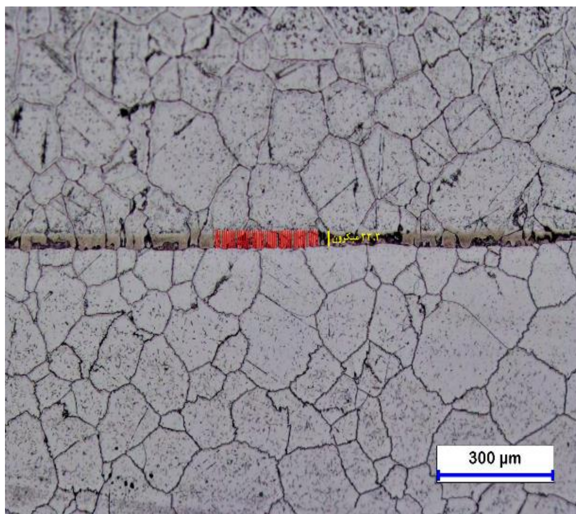
(الف)



(ب)

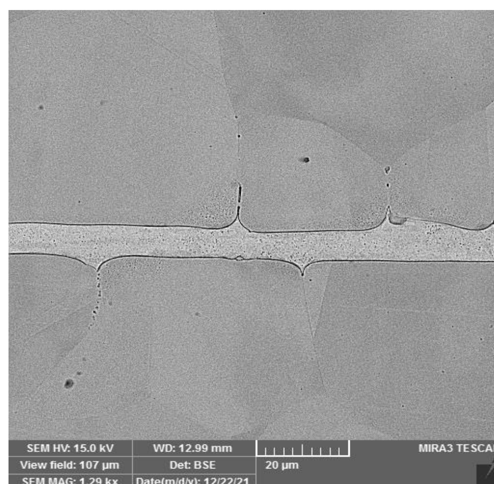


(ج)

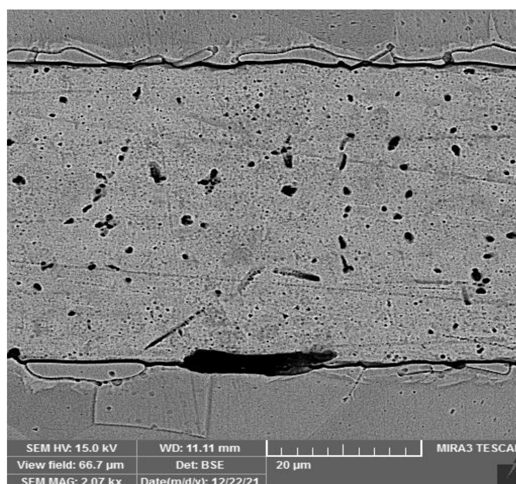


(د)

شکل ۲ تصاویر نوری از درز اتصال نمونه‌های: (الف) ۲لایه، (ب) ۵لایه در دمای ۱۰۷۰درجه سانتی‌گراد و نمونه‌های: (ج) ۲لایه، (د) ۵ لایه در دمای ۱۱۲۰درجه سانتی‌گراد به مدت زمان ٦۰ دقیقه



(الف)

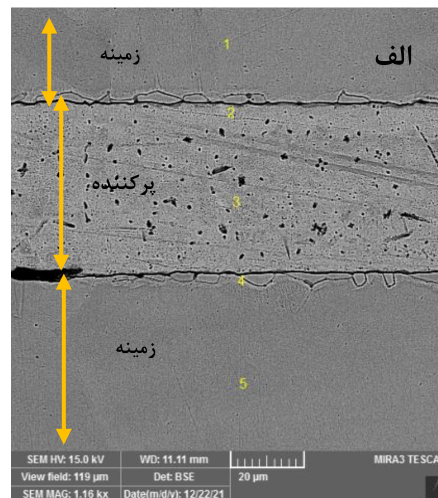


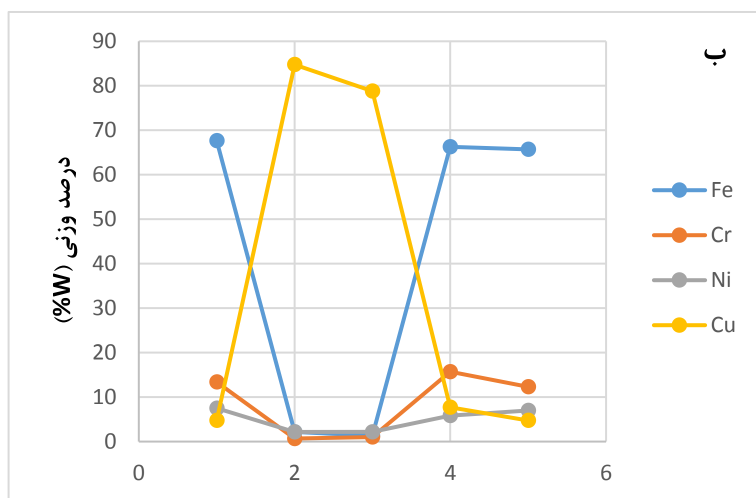
(ب)

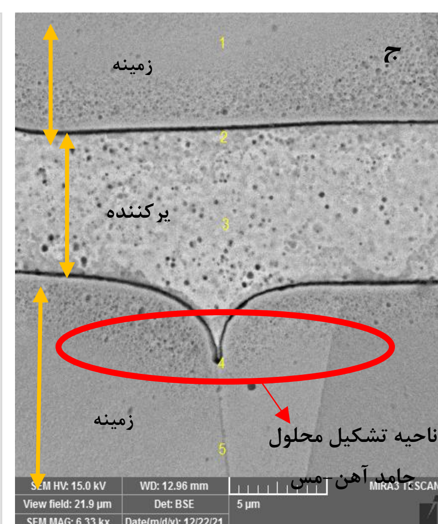
شکل ۳ افزایش انحنای مرزدانه با افزایش دما در نمونه‌های: (الف) ٦۰-۱۰۷۰دقیقه و (ب) ٦۰-۱۱۲۰دقیقه

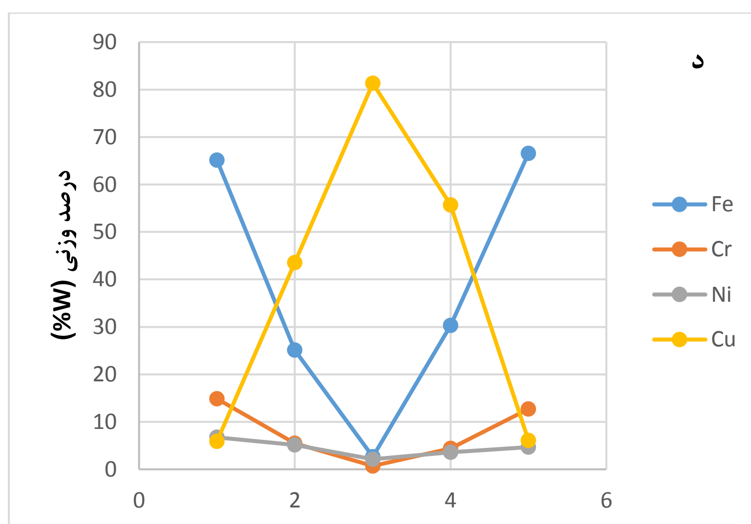
شکل (٤) تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی و آنالیز طیف سنجی پراش انرژی پرتو ایکس در امتداد درز اتصال نمونه‌های ۱۰۷۰ و ۱۱۲۰ درجه سانتی‌گراد و ۶۰ دقیقه را نمایش می‌دهد. به‌دلیل حلالیت کم آهن در مس در دمای ۱۰۷۰ درجه سانتی‌گراد در لایه واسطه، تنها مقدار کمی آهن و کروم مشاهده می‌شود. اما حلالیت آهن در مس با افزایش دمای لحیم‌کاری به ۱۱۲۰ درجه سانتی‌گراد افزایش می‌یابد. درواقع مس در فصل مشترک فولاد/ فلز پرکننده مسی شروع به انحلال آهن کرده و به طور پیوسته به زمینه نفوذ می‌کند. می‌توان فرض کرد که در لایه نفوذی، ترکیبی از Cu و γFe موجود است [16].

همچنین مقایسه شکل‌های (٤-ب) با (٤-د) نشان داد که افزایش دما، باعث افزایش ارتعاشات اتمی شده و در پی آن نفوذ عناصر افزایش یافته و مس از فلز پرکننده به فلز پایه نفوذ می‌کند. همچنین عناصر آهن، کروم و نیکل نیز از فلز پایه به فلزپرکننده مسی نفوذ کرده که این خود باعث بهبود پیوند می‌گردد. همچنین شیاردارشدن مرزدانه‌ها با افزایش دما از ۱۰۷۰ به ۱۱۲۰ درجه سانتی‌گراد، میزان نفوذ عناصر آلیاژی اصلی را به علت منحنی شکل بودن فصل مشترک مایع/جامد و افزایش نفوذ مرزدانه‌ای، افزایش داده است. لذا با توجه به ریزدانه‌تر بودن نمونه ۱۱۲۰-۶۰دقیقه نسبت به نمونه ۱۰۷۰-۶۰دقیقه، میزان نفوذ در این نمونه بیشتر است. پس می‌توان استنباط کرد که دمای ۱۱۲۰ درجه سانتی‌گراد برای نفوذ عناصر کافی است تا بتواند پیوند خوبی را بدون تشکیل هیچ‌گونه ترکیب بین فلزی ایجاد کند [16].

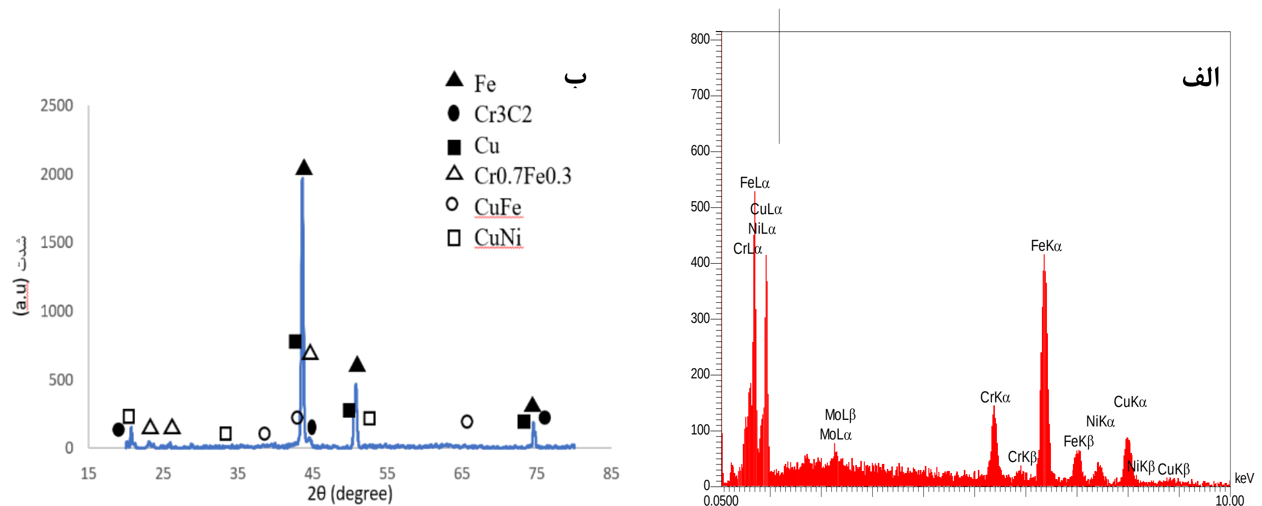








شکل ٤ تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی و نمودار آنالیز طیف سنجی پراش انرژی پرتو ایکس به صورت خطی نمونه‌های: (الف و ب) ۱۰۷۰-۶۰°C دقیقه، و (ج و د) ۱۱۲۰-۶۰°C دقیقه



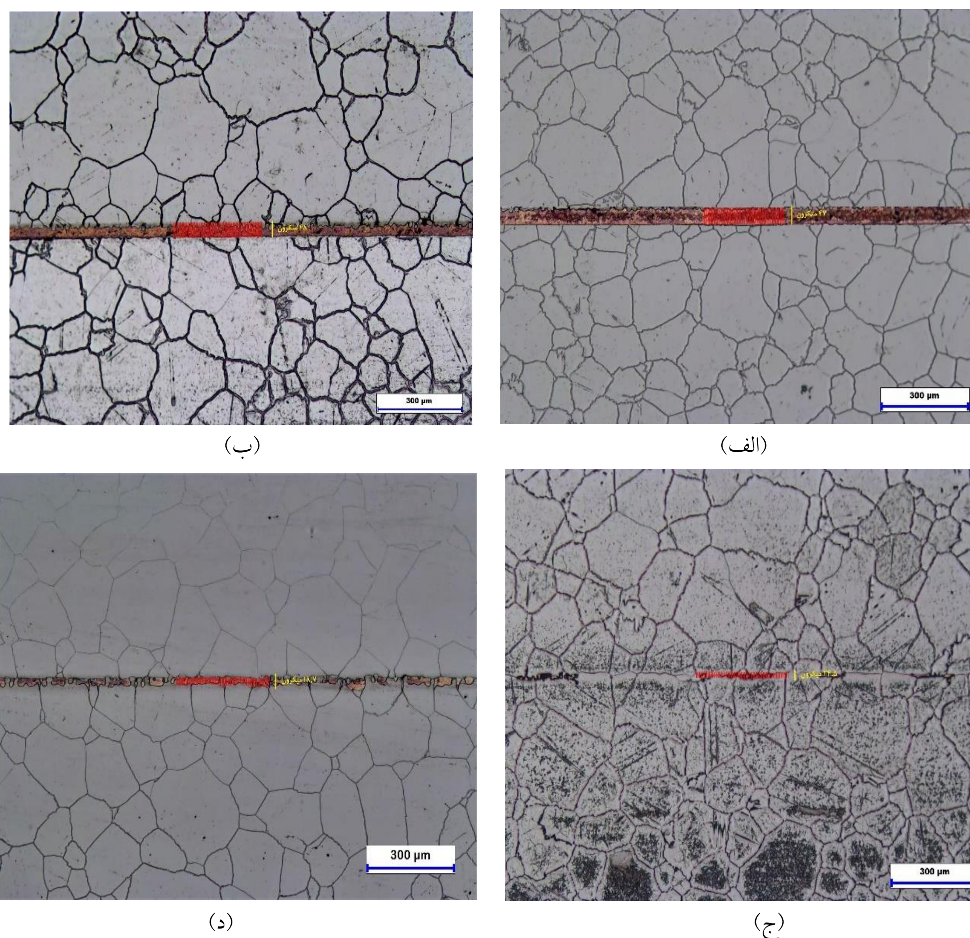
شکل ٥ (الف) تحلیل طیف سنجی پراکندگی انرژی پرتو ایکس و (ب) تفرق پرتو ایکس

شکل (٦) تصاویر میکروسکوپ نوری از نمونه‌های دو و پنج لایه در زمان‌های نگه‌داری ۳۰ و ۹۰ دقیقه و دمای ۱۱۲۰ درجه سانتی‌گراد را نمایش می‌دهد. در شکل های (٦-الف) و (٦-ب) واضح است که مدت زمان ۳۰ دقیقه برای نفوذ کافی نبوده و اتصال به خوبی انجام نشده‌است و پهنای ناحیه اتصال به ترتیب ٤٨و ٤٧ میکرون تقریباً برابر ضخامت اولیه لایه پرکننده مسی می‌باشد. در مدت زمان ۹۰ دقیقه (شکل های ٦-ج و ٦-د) نفوذ کاملا صورت گرفته، پهنای باند اتصال به ترتیب به ١٨,٧ و ٢٤,٥ میکرون کاهش پیدا کرده که نشانگر نفوذ مس به زیرلایه فولادی بوده و اتصالی مناسب را به‌دست داده‌است. مشاهده می‌شود که زمان ۳۰ دقیقه برای اتصال کافی نبوده و در مقایسه با زمان ۹۰ دقیقه، ضخامت لایه واسطه مسی به میزان حدود ٥٥ درصد کاهش یافته است. میانگین اندازه دانه در نمونه های دولایه و پنج لایه نیز با افزایش زمان به ترتیب از ١١٩ و ١٢٦ میکرون به ٧٤ و ٩٤ میکرون کاهش یافته است. با توجه به میزان نفوذ و تغییر پهنای ناحیه اتصال و اندازه دانه به نظر می رسد اتصال انجام شده در زمان ۹۰ دقیقه شرایط بهتری داشته است.

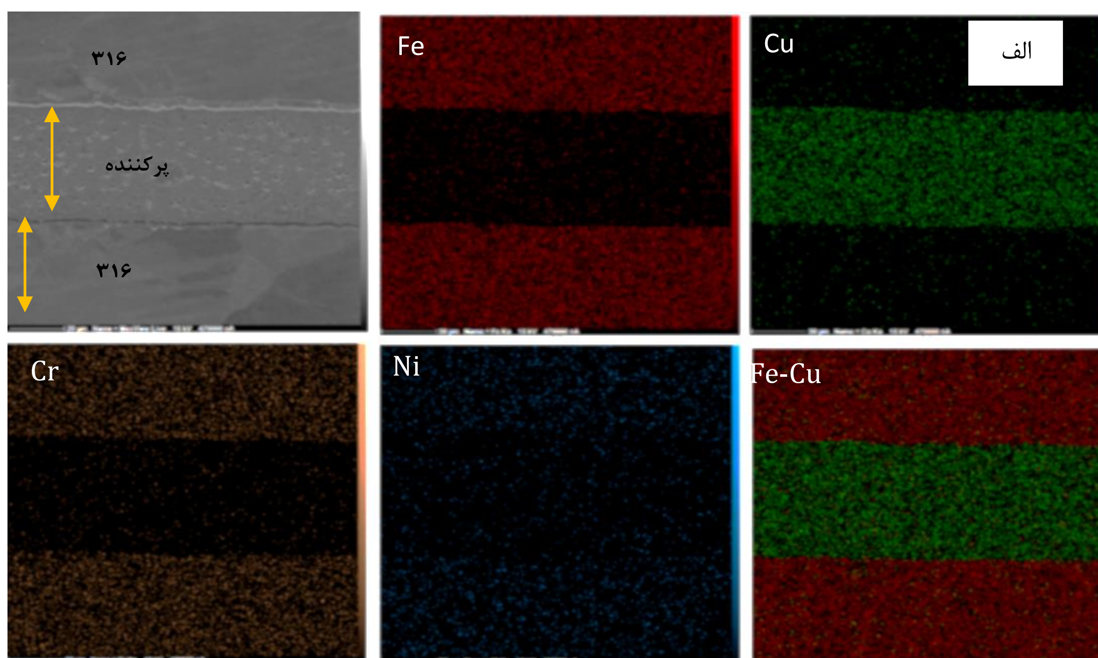
در مرحله اولیه لحیم‌کاری سخت، لایه واسطه مس تقریبا ذوب شده و سپس فولاد زنگ‌نزن از طریق مهاجرت مس مایع به فلز پایه حل می‌شود. در نتیجه، برخی از مرزهای دانه فولاد مجاور لایه مس شیاردار شده و Fe وCr از سمت فلز پایه به ناحیه اتصال و اتم‌های مس از لایه ذوب شده به منطقه انحلال نفوذ می‌کنند و با Fe و Cr در طول فصل مشترک واکنش می‌دهد. با افزایش انحلال فلز پایه ناشی از افزایش زمان، فصل مشترک لایه واسطه/زمینه با Cu و Fe غنی شده است. به عبارتی دیگر، اتم‌های Fe و Cr که از فلز پایه می‌آیند، به فاز Fe-Cr تبدیل شده که با افزایش زمان نگهداری مقدار این فاز افزایش می‌یابد [13].

شکل (٧) توزیع عناصر در اتصال لحیم‌کاری سخت ٣١٦/مس/٣١٦ به‌دست آمده توسط آنالیز طیف سنجی پراش پرتو ایکس به صورت نقشه‌ای را ارائه می‌دهد. همان‌طور که در نتایج مشخص است در زمان ۳۰ دقیقه میزان نفوذ عناصر تقریبا صفر است و با گذشت زمان تا ۹۰ دقیقه نفوذ عناصر بیشتر شده و توزیع یکنواخت‌تری را به‌دست داده است.

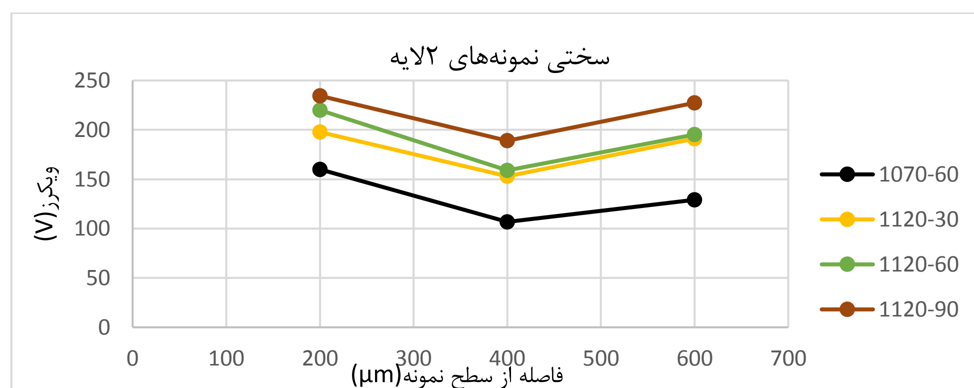
شکل (٨) نمودار سختی ویکرز نمونه‌های ٢ و ٥ لایه را نمایش می‌دهد. همان‌طور که مشخص است، سختی نمونه‌های دولایه به علت کوچک‌تر بودن اندازه دانه آن‌ها، بالاتر از نمونه‌های ٥لایه بود. همچنین بیشترین میزان سختی مربوط به نمونه ۹۰-١١٢٠ بود، که علت را می‌توان این‌طور بیان نمود این نمونه در مقایسه با سایر نمونه‌ها بیشترین دما و زمان اتصال برای نفوذ بیشتر عناصر و کمترین متوسط اندازه دانه را داشت. با مشاهده نتایج سختی سنجی نمونه‌های ٢ و ٥ لایه می‌توان دریافت که دمای ١٠٧٠ °C در نمونه ٦٠-١٠٧٠ و زمان ۳۰ دقیقه در دمای ١١٢٠ °C کافی نبوده و سختی قطعات نسبت به سایر نمونه‌ها کمتر است.

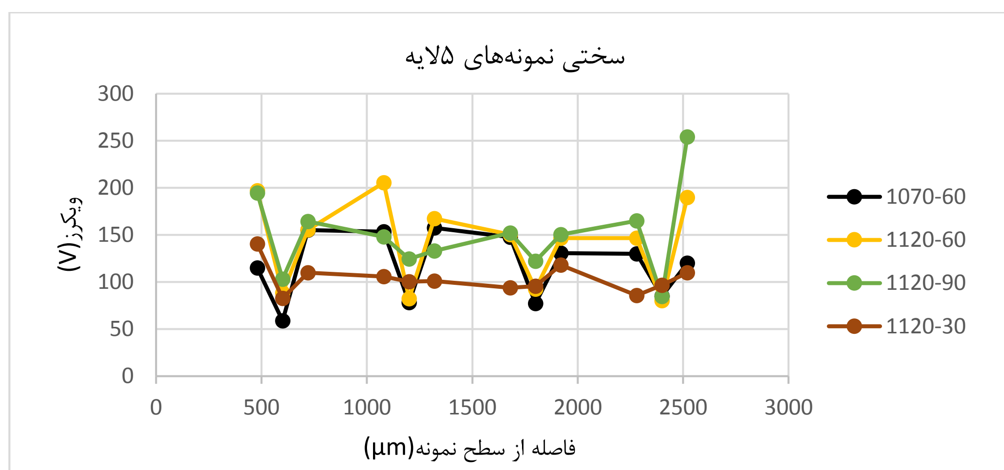


شکل ٦ تصاویر نوری از درز اتصال نمونه‌های: (الف) ۲ لایه، (ب) ۵ لایه با زمان نگه‌داری ۳۰ دقیقه، و نمونه‌های: (ج) ۲لایه، (د) ۵ لایه با زمان نگه‌داری ۹۰ دقیقه در دمای ۱۱۲۰درجه سانتی‌گراد



شکل ۷ تصویر آنالیز طیف سنجی نقشه‌ای نمونه‌های: (الف) 1120-30°C دقیقه، (ب) 1120-60°C دقیقه و (ج) 1120-90°C دقیقه





شکل ۸ سختی سنجی درز اتصال نمونه‌های: (الف) ۲ لایه، (ب) ۵ لایه

نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در این مطالعه تأثیر دما و زمان نگه‌داری در کوره بر اتصـــال ساندویچی فولاد زنگ نزن 316 L به‌روش لحیم‌کاری سخت با استفاده از فلز پرکننده مسی خالص بررسی گردید. نتایجی که از این مطالعه می‌توان گرفت عبارتند از:

۱. دمای ۱۰۷۰ درجه سانتی گراد نسبت به ۱۱۲۰ درجه سانتی گراد جهت اتصال فولاد به لایه واسطه مس کافی نبوده و نتوانست اتصال مناسبی برقرار کند. با افزایش دما نفوذ عناصر افزایش پیدا کرد و پهنای ناحیه اتصال کاهش یافت.

۲. زمان ۳۰ دقیقه برای اتصال کافی نبوده و در مقایسه با آن، در زمان۹۰ دقیقه ضخامت ناحیه اتصال حدود ٪۵۵ بر اثر نفوذ مس به زیرلایه فولادی کاهش یافت. همچنین با افزایش زمان از ۶۰ به ۹۰ دقیقه ضخامت لایه مس و میانگین اندازه دانه کاهش پیدا کرد. لذا به نظر می‌رسد که زمان ۹۰ دقیقه بهترین شرایط اتصال‌دهی را مهیا می‌کند.

۳. سختی اتصالات دو لایه با پنج لایه نمونه‌ها به دلیل تفاوت اندازه دانه آن‌ها با یکدیگر متفاوت بود. در واقع نمونه‌های دولایه با متوسط اندازه دانه کمتر، سختی بالاتری داشتند.

تقدیر و تشکر

در اینجا نویسندگان از شرکت طاها قالب توس جهت حمایت از این پژوهش تشکر می‌کنند.

مراجع

[1] H. Palkowski, O. A. Sokolova, A. Carrado, Eds., *Encyclopedia of Automotive Engineering*, Wiley Online Library, 2013.

[2] R. Iwaikowicz, R. Rutkowski, T. Graczyk, "Review of joining methods of sandwich panels in ship construction", *Transactions on the Built Environment*, vol. 68, pp. 10-19, 2003.

[3] J. Cao, J. L. Gerenestedt, "Design and testing of joints for composite sandwich/steel hybrid ship hulls", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 35, pp. 1091-1105, 2004.

[4] M. Hietala, A. S. Hamada, M. Keskitalo, M. Jaskari, "Mechanical characterization of laser-welded double-lap joints in ultra-high and low strength steels for sandwich panel applications", *Materials Today: Proceedings*, vol. 28, pp. 2-7, 2019.

[5] J. E. Hesselgreaves, *Compact Heat Exchangers: Selection, Design and Operation*, Oxford: Pergamon Press, 2001.

[6] D. M. Jacobson, G. Humpston, *Principles of Brazing*, Ohio: ASM International, 2005.

[7] ASME, *BPVC Section II-Materials-Part C-Specifications for Welding Rods, Electrodes, and Filler Metals*, New York: ASME, 2021.

[8] Y. Yao, Y. Han, K. Zhang, H. Zhu, W. Zhang, H. Qian, C. Zhou, L. Zhang, "The dependence of fracture mode on interfacial microstructure in TA1 pure titanium/AgCuNi/304 stainless steel vacuum brazed joints", *Vacuum*, vol. 203, 111318, 2022.

[9] H.S. Na, J.K. Kim, B.Y. Jeong, C.Y. Kang, "Effect of Brazing Conditions on the Microstructure and Mechanical Properties of Duplex Stainless Steels to Cr-Cu Alloy with Cu-Base Insert Metal", *Metals and Materials International*, vol. 13, pp. 511-515, 2007.

[10] M. S. Kiranmayee, A. K. Jha, S. K. Manwatkar, D. P. Sudhakar, P. R. Narayanan, K. Sreekumar, P. P. Sinha, "Microstructural Characterisation of Copper- Stainless Steel brazed joint with Copper based filler metal", *Materials Science*, vol. 710, pp. 650-655, 2012.

[11] W. Zhu, H. Zhang, C. Guo, Y. Liu, X. Ran, "Wetting and brazing characteristic of high nitrogen austenitic stainless steel and 316L austenitic stainless steel by Ag–Cu filler", *Vacuum*, vol. 166, pp. 97-106, 2019.

[12] M. M. Atabaki, J. N. Wati, J. Idris, "Transient Liquid Phase Diffusion Brazing of Stainless Steel 304", *Welding Journal*, vol. 92, pp. 57-63, 2013.

[13] Y. Zheng, N. Li, J. Yan, Y. Cao, "The microstructure and mechanical properties of 1Cr17Ni2/QAl7 brazed joints using Cu-Mn-Ni-Ag brazing alloy", *Materials Science and Engineering A*, vol. 661, pp. 25-31, 2016.

[14] T. Fukikoshi, Y. Watanabe, Y. Miyazawa, F. Kanasaki, "Brazing of copper to stainless steel with a low-silver-content brazing filler me", *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 61, article id. 012016, 2014.

[15] S. A. Sajjadi, *Fundamentals and applications of steels heat treatment*, Mashhad: Vazhgan Kherad, 2014 (In Persian).

[16] W. Jiang, J. Gong, S. T. Tu, "A study of the effect of filler metal thickness on tensile strength for a stainless steel plate-fin structure by experiment and finite element method", *Materials and Design*, vol. 31, pp. 2387-2396, 2010.